

Dégradation des contacts mécaniques dans un milieu pollué

M. R. SARI^a, A. HAIAHEM^b, L. FLAMAND^c

a. Département de Mécanique, Université 20 Août 1955 de Skikda BP 26, 21000 Algérie

b. Laboratoire de Mécanique Industrielle, Université Badji Mokhtar de Annaba BP 12, 23000 Algérie

c. Laboratoire de Mécanique des Contacts et des Structures, CNRS UMR 5514 INSA de Lyon 69621 Villeurbanne cedex, France

Résumé :

L'étude des effets de la pollution solide des lubrifiants est le centre d'intérêt de nombreuses études dans ces dernières années. En effet, la présence des particules polluantes dans les contacts mécaniques est inévitable. Ces particules indésirables peuvent endommager les surfaces et conduire à la fatigue et à l'usure des éléments de machines.

Ce papier décrit l'ensemble des travaux menés afin de prédire les risques d'endommagements sous l'effet de la pollution solide.

Abstract :

The problem of the effects of solid lubricant contamination has been studied by various authors over the last decades. The presence of solid contaminants in lubricants is inevitable. These undesirable particles can damage surfaces and lead to fatigue and wear of machine elements.

This paper describes the different works in order to predict damage risk under lubricant contamination.

Mots Clefs : Contact, Lubrification, Pollution solide, Frottement, Usure, Dégradation.

1 Introduction :

Dans de nombreuses applications, le lubrifiant qui a pour fonction principale de réduire les frottements et l'usure, contient malheureusement un vaste nombre de particules de taille et de propriétés très variées. Ces particules indésirables peuvent endommager les surfaces et conduire à la dégradation rapide des éléments machines.

L'étude des effets de la pollution solide des lubrifiants est donc le centre d'intérêt de nombreuses études. Dans ces dernières années, ce phénomène a été étudié expérimentalement et numériquement par plusieurs auteurs. L'entraînement et la déformation des particules dans un contact EHD ont été étudiées expérimentalement [1, 2, 3], en utilisant la technique d'interférométrie optique pour suivre le comportement des particules dans le contact. Numériquement de nombreux auteurs [4, 5, 6] ont calculé le champ de pression lié à la présence d'un indent. D'autres, ont suivi l'indent dans le contact et son effet sur l'épaisseur du film d'huile [7, 8]. Ce papier décrit un ensemble de travaux afin de prédire les risques d'endommagements sous l'effet de la pollution solide.

L'article est divisé en trois parties. L'usure des roues dentées sous l'effet du polluant sable est présentée dans une première partie. La deuxième partie présente les résultats d'investigation granulométrique et de mesure d'indice de réfraction. Ces deux paramètres constituent un excellent indicateur d'usure et de pollution dans un milieu pollué. Dans la dernière partie, l'évolution du coefficient de frottement sous l'effet de la pollution pour un contact glissant est étudiée.

2 Usure des roues dentées [9]:

L'usure des roues dentées sous l'effet de la pollution solide de la lubrification a été étudiée au moyen d'un dispositif original où sont montés en contact une roue et un pignon (voir annexe). Le polluant

utilisé est le sable du sahara. Le choix des paramètres de fonctionnement, des caractéristiques des roues dentées et du lubrifiant permet d'établir les conditions de lubrification EHD.

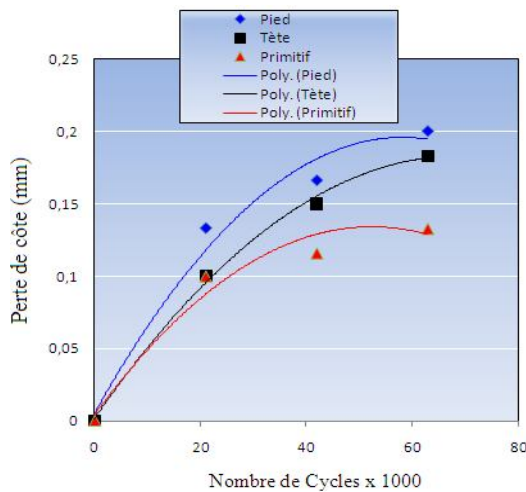


Fig. 1 Perte de cote dans la roue

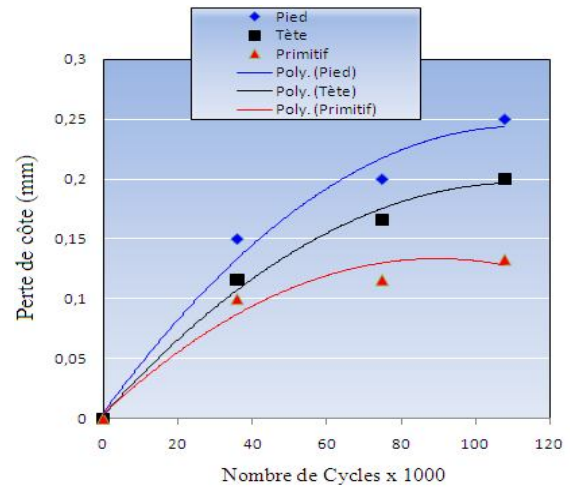


Fig. 2 Perte de cote dans le pignon

D'après les résultats d'investigation expérimentale, il a été montré (figures 1 et 2) que la présence des grains de sable dans le lubrifiant provoque des pertes de cotes notables aux premiers cycles de fonctionnement. Cette perte est élevée au niveau de la racine de la dent (au pied) du fait que les particules de sable présentes dans le lubrifiant dans leurs passages dans le contact s'associent au glissement qui est à son maximum au pied. La présence des grains de sable dans cette zone a pour effet l'accentuation du degré d'usure. La perte de cote au niveau de la tête de la dent est moins accentuée par rapport à l'usure au pied du fait qu'à cet endroit la vitesse de glissement est moins élevée en comparaison à celle de la racine de la dent. Notons qu'il n'y a pas seulement l'effet du glissement, la dent est soumise également à des efforts de flexion. Ces efforts font fléchir la tête alors que la racine reste rigide, donc lorsque le couple transmis augmente, la perte de cote dans le pied de la dent est importante. Par contre au niveau de la zone du primitif, le degré d'usure est faible par rapport à la racine et la tête de la dent, ceci est expliqué par le fait que dans cet endroit, le glissement est quasiment absent (zone de roulement pur). Donc s'il y a arrachement de matière à ce niveau, il est provoqué par l'écrasement (indentation de la surface) non accompagné du glissement des particules présentes dans le lubrifiant passant par la zone de contact.

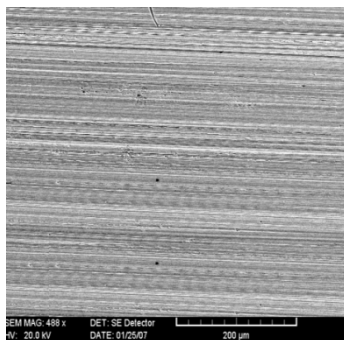


Fig. 3 Image SEM (Aspect de la denture avant fonctionnement)

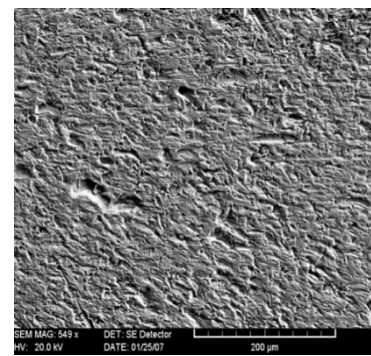


Fig. 4 Image SEM au niveau du primitif (Aspect après fonctionnement).

Pour mieux comprendre le phénomène d'usure dans les conditions de contamination les plus sévères (avec la présence du sable), des photomicrographies SEM ont été prises sur une denture du pignon. La (figure 3) caractérise l'aspect de la denture avant fonctionnement. Les (figures 4, 5 et 6), qui donne une image détaillée de l'aspect des dentures après fonctionnement, montre une abrasion sévère (rayures, sillons et écoulement plastique) dans la direction du glissement. L'abrasion est très sévère,

surtout au pied de denture (figure 5). Au niveau de la tête (figure 6), les traces d'usure sont moins intenses. Dans cette dernière zone, la denture travaille en flexion et le glissement est relativement faible, en comparaison avec le pied de denture. Au primitif, l'usure s'apparente beaucoup à de l'adhésion et l'indentation (figure 4). La présence des indents est notable dans cette zone. Ces derniers constituent un défaut géométrique, qui sera assurément un site spécifique de fatigue.

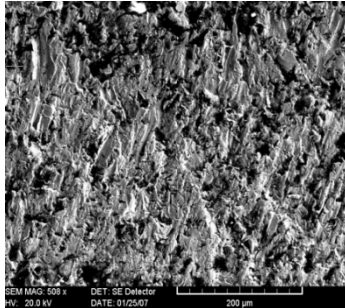


Fig. 5 Image SEM au niveau du pied
(Aspect après fonctionnement)

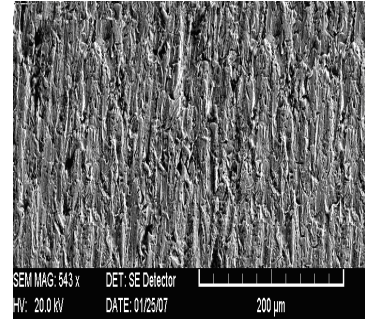


Fig. 6 Image SEM au niveau de la tête
(Aspect après fonctionnement)

3 Investigation Granulométrique et Indice de réfraction [10, 11]:

Dans cette partie de recherche, on a procédé à des analyses d'huile prélevé directement sur le mécanisme. Les examens d'investigation granulométrique et de mesure d'indice de réfraction permettraient de donner des indications sur l'état de santé du système tribologique.

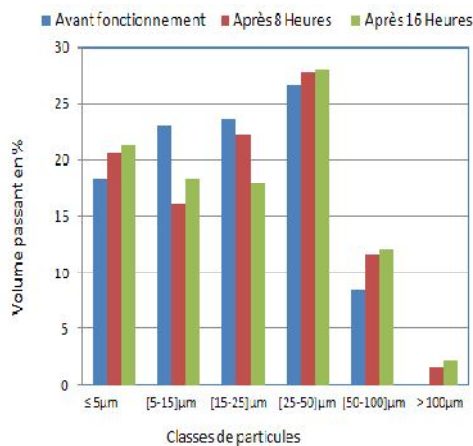


FIG. 7 Distribution des particules

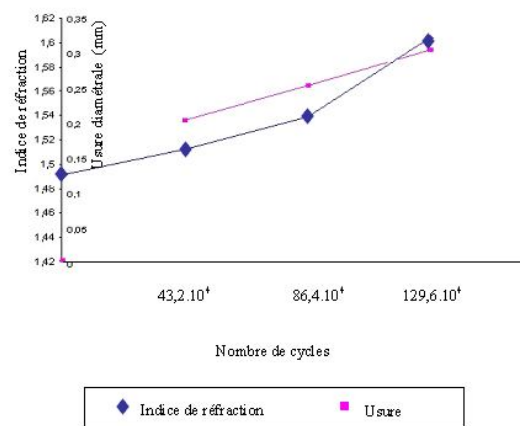


FIG. 8 Indice de réfraction

L'investigation granulométrique donne une indication sérieuse sur les particules véhiculée par le lubrifiant et permettrait d'avoir un signal d'endommagement des surfaces. L'analyse des échantillons a été réalisée à l'aide d'un granulomètre à laser de type MASTERSIZER.

La (figure 7) montre une distribution statistique des particules présentes dans un échantillon d'huile de masse volumique 1 g/cm³. Pour mieux visualiser cette distribution, les prélèvements ont été pris chaque 8 heures de fonctionnement. Les évolutions obtenus sont comparés ensuite avec ceux d'une huile polluée avant fonctionnement. Nous constatons que l'accroissement des particules de petites tailles ≤ 5μm et le décroissement des particules de tailles (15-25) μm, ne fait pas pressentir l'avarie. Par contre pour les classes de tailles (50-100) μm et > 100 μm, l'accroissement renseigne sur le début de dégradation. La présence de particules de forte granulométrie dans le lubrifiant provoque des avaries catastrophiques.

L'indice de réfraction est une caractéristique spécifique utilisée surtout en chimie, accessible expérimentalement par mesure directe. C'est une constante physique qui caractérise le corps et en détermine sa pureté. Il dépend en grande partie de la composition du corps et de sa structure chimique. D'après les résultats obtenus (figure 8), on constate une augmentation de l'indice de réfraction avec le

temps de fonctionnement et avec l'usure. En effet, en déterminant un seuil de cet indice par rapport à l'usure, on peut prévoir les périodes de vidange sans utiliser d'autres moyens qui nécessitent des équipements plus coûteux dans le cadre de la maintenance conditionnelle. L'indice de réfraction utilisé en ligne peut donc être un excellent indicateur de pollution dans les milieux pollués.

4 Evolution du frottement dans un milieu pollué [12]:

Dans cette étude l'effet du polluant sable et la variation de la température sur l'évolution du coefficient de frottement dans un contact glissant a été étudiée. Ici, plusieurs essais ont été planifiés. Les expériences sont réalisées sur la machine HFRR (High Frequency Reciprocating Rig). Cette machine (voir annexe) est fortement recommandée pour les mesures de frottement dans les conditions de lubrification limite. Le principe consiste à faire frotter une bille dure sur un disque. L'épaisseur du film d'huile exprimée en % est mesurée par la technique ECR (Electrical Contact Resistance). Lorsque la valeur ECR=0, on a un contact métal-métal (0% séparation). Par contre une valeur ECR=1 indique que la séparation entre les massifs est assurée à 100%.

La (figure 9-a) montre le comportement du film d'huile pour une charge normale de 0.981 N à une température de fonctionnement 40 °C. D'après les résultats obtenus, on voit que la séparation avec une huile non polluée, fluctue aux premiers instants de fonctionnement. A ce niveau, la séparation n'est pas complètement assurée et elle présente un pourcentage peu élevée. Après un certain temps de fonctionnement, la séparation augmente graduellement et devient stable en assurant ainsi une séparation complète entre la bille et le disque (c'est-à-dire une épaisseur minimale du film d'huile). L'effet de la présence des polluants sur le comportement du film d'huile a été visualisée dans les (figures 9-b et 9-c). Les résultats obtenus montrent que la présence des grains de sable dans le contact perturbe le bon fonctionnement du mécanisme et conduit à de fluctuations notables de la séparation. La fluctuation devient plus significative avec une concentration élevée en polluant (figure 9-c). Ceci peut être expliqué par le passage d'une quantité relativement importante des particules dans le contact au fur et à mesure que la concentration est élevée.

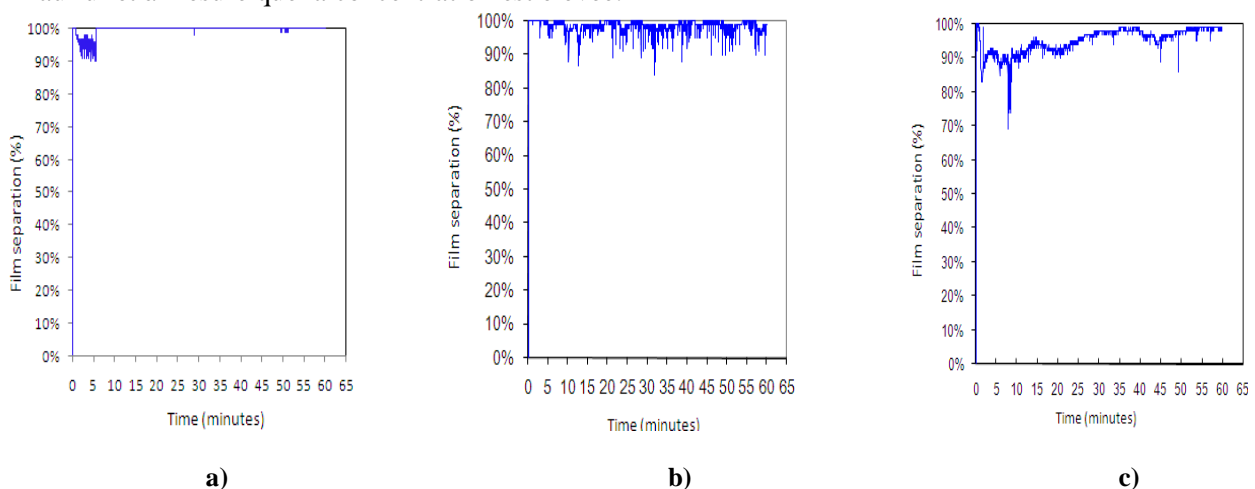


Fig. 9 Séparation du film d'huile dans le temps

a) $W=0.981$ N (sans pollution), b) $W=0.981$ N et $C = 5$ g/l, c) $W=0.981$ N et $C = 10$ g/l

L'évolution du coefficient de frottement pour différentes concentrations en polluant dans l'huile de lubrification à une charge normale 0.981 N et une température de fonctionnement 40°C, a été également étudiée. Les résultats obtenus (figure 10) montrent qu'il y'a une parfaite correspondance entre la séparation et le coefficient de frottement. La présence du sable dans le lubrifiant perturbe la séparation et donne un coefficient de frottement élevée (figure 10-b) comparée avec celui d'un fonctionnement non pollué (figure 10-a). En effet, les particules de sable dans un contact glissant ont un effet significatif sur la structure des surfaces, et conduisent à un mauvais état de surface. Donc la présence des particules solides dans un contact EHD accélère le frottement et donne un coefficient de frottement élevée. Ce dernier sera plus accentué avec une concentration élevée en polluant dans le lubrifiant (figure 10-c). Ceci peut être expliqué par le passage plus au moins prononcée des particules solides dans le contact.

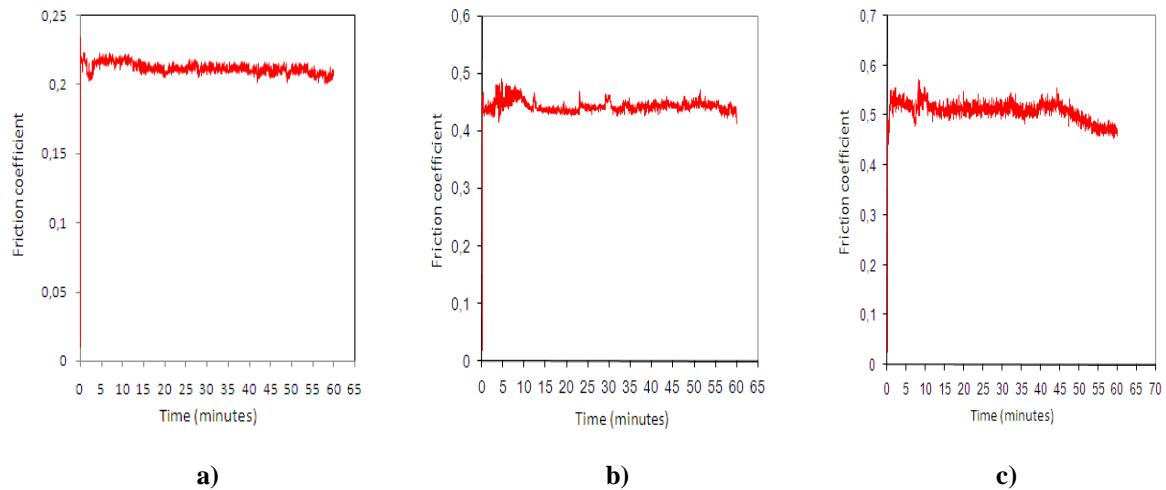


Fig. 10 Evolution du coefficient de frottement dans le temps

a) $W=0.981$ N (sans pollution), b) $W=0.981$ N et $C = 5$ g/l, c) $W=0.981$ N et $C = 10$ g/l

L'effet de la variation de la température sur la séparation d'huile et le coefficient de frottement pour un fonctionnement dans un milieu pollué, a été visualisé dans la (figure 11). Elle montre qu'au fur et à mesure que la température augmente, la séparation diminue. Ceci est dû généralement au comportement de l'huile avec la température. On sait bien qu'avec l'augmentation de la température, la viscosité de l'huile diminue. Cette diminution conduit généralement à la rupture du film d'huile et favorise l'accroissement du frottement entre les surfaces en contact. Le comportement aléatoire de la séparation (fluctuation) est causé par la présence des grains de sable dans le lubrifiant. On constate également d'après la (figure 11) qu'il y a une relation abondante entre la séparation et le coefficient de frottement. En effet, le décroissement du film d'huile conduit à l'élévation du coefficient de frottement et vice-versa. Cet accroissement du frottement devient plus accentué avec la présence des particules solides dans le contact. Dans un contact glissant, l'association d'une température élevée avec des grains abrasifs, accélère le risque d'endommagement et mène à une mauvaise qualité de surface et par conséquent un coefficient de frottement très élevé.

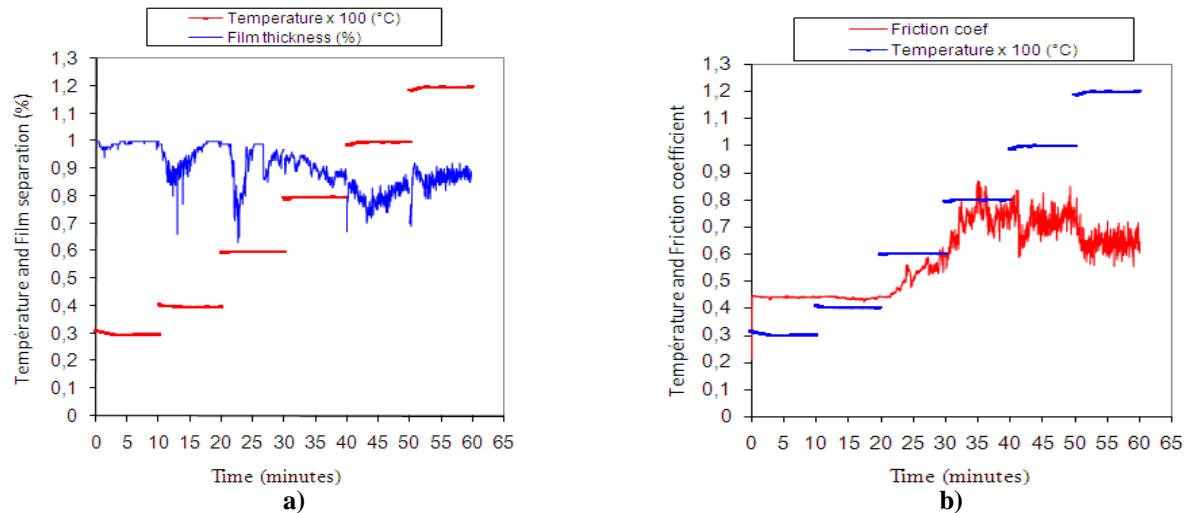


Fig. 11 Séparation du film d'huile et coefficient de frottement au cours du temps (Température variable)

a) $W=1.96$ N, $C = 10$ g/l, b) $W=1.96$ N, $C = 10$ g/l

5 Conclusion

L'objectif des travaux réalisés était d'une part, de mieux comprendre le phénomène de la pollution solide de la lubrification et d'autre part, d'appréhender son effet sur les systèmes tribologiques. Pour ce faire, des outils expérimentaux ont été utilisés ; certains ont été développés spécifiquement.

Les principales conclusions que l'on peut tirer des travaux menés sont:

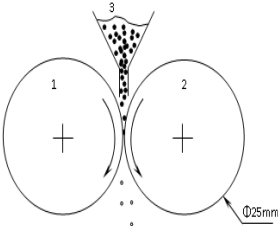
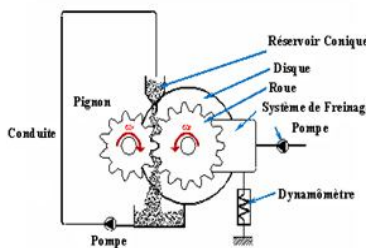
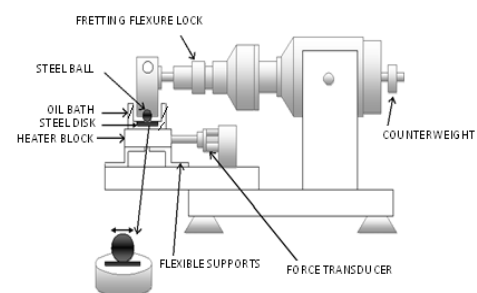
- La présence des particules solides dans l'huile de lubrification provoque des usures notables dans les engrenages aux premiers cycles de fonctionnement.
- L'usure est élevée au niveau de la racine de la dent (au pied) par rapport à la tête de celle-ci.
- La distribution statistique des particules contenues dans le lubrifiant provoque des avaries catastrophiques et constitue un excellent indicateur de pollution et d'endommagement des surfaces dans les milieux pollués.
- L'indice de réfraction augmente avec l'augmentation du temps de fonctionnement et de l'usure.
- L'indice de réfraction utilisé en ligne peut donc être un excellent indicateur d'usure et de pollution.
- La présence des particules solides dans le contact, perturbe la séparation d'huile entre les massifs en glissement pur.
- La présence des polluants solides dans les lubrifiants accélère la dégradation des surfaces en contact glissant et donne un coefficient de frottement élevé.
- Une concentration élevée de la pollution dans le lubrifiant favorise d'avantage le frottement.
- La présence des particules solides dans le contact avec une température croissante conduit à la réduction du film d'huile et par conséquent l'augmentation du frottement entre les massifs.

Donc, la présence inévitable des particules solides dans le lubrifiant accélère la dégradation des surfaces en contact et les résultats obtenus, expriment en conséquence les raisons de réduction de la durée de vie des mécanismes dans un milieu pollué.

Références Bibliographiques:

- [1] Dwyer Joyce, R. S., Hamer, J. C., Sayles, R. S., Ioannides, E. Lubricant screening for debris effects to improve fatigue and wear life. Proceedings of 18th Leeds-Lyon Symposium on Tribology, Elsevier, p. 57-63, 1992.
- [2] Nelias, D., Sainsot, P., Flamand, L. Deformation of a particular metallic contaminant and role on surface damage in high speed ball bearing. Proceedings of 18th Leeds-Lyon Symposium on Tribology, Elsevier, p. 145-151, 1992.
- [3] Cann, P. M. E., Hamer, J. C., Sayles, R. S., Spikes, H. A., Ioannides, E. Direct observation of particle entry and deformation in rolling EHD contact. Proceedings of 22nd Leeds-Lyon Symposium on Tribology, Elsevier, p. 127-134, 1996.
- [4] Ko, C. N., Ioannides, E. Debris denting – The associated residual stresses and their effect on the fatigue life of sliding bearing, An FEM analysis. Proceedings of 15th Leeds-Lyon Symposium on Tribology, Elsevier, p. 199-207, 1989.
- [5] Lubrecht, A. A., Venner, C. H., Lane, S., Jacobson, B., Iannides, E. Surface damage – comparison of theoretical and experimental endurance lives of rolling bearings. Proceedings of the Japan International Tribology Conference, p. 185-190, Nagoya, Japan 1990.
- [6] Lubrecht, A. A., Dwyer Joyce, R. S., Ioannides, E. Analysis of the influence of indentations on contact life. Proceedings of 19th Leeds-Lyon Symposium on Tribology, p. 173-181, 1993.
- [7] Kaneta, M., Sakai, T., Nishikawa, H. Optical interferometric observations of the effects of a bump on point contact EHL. ASME J. of Tribology, vol. 114(4), p. 779-784, 1992.
- [8] Kaneta, M., Nishikawa, H. Local reduction in thickness of point contact EHL films caused by a transversely oriented moving groove and its recovery. ASME J. of Tribology, vol. 116, p. 635-639, 1994.
- [9] Sari, M. R., Haiahem, A., Flamand, L. Effect of lubricant contamination on gear wear. Tribology Letters, vol. 27, p. 119-126, 2007.
- [10] Sari M. R., Haiahem A., Flamand L., Influence de la Pollution Solide sur les Mécanismes Lubrifiés, 19^{ème} Congrès Français de Mécanique, Marseille (France), 24-28 Août 2009.
- [11] Haiahem A., Mansouri M., Flamand L., Effet du sable sur le lubrifiant dans les contacts lubrifiés, PENTOM, Marrakech (Maroc), 18-20 avril 2005.
- [12] Sari M. R., Ville F., Haiahem A., Flamand L., Effect of Lubricant Contamination on friction and wear in an EHL contact, MECHANIKA, Volume 82, Issue 2, pp. 43-49, Eds Kaunas university, 2010.

Annexe

Moyens et Techniques expérimentales utilisées			
Paramètres mesurés	Indice réfraction	Usure des engrenages et Investigation granulométrique	Evolution du coefficient de frottement
Modèle de contact utilisé	 <p style="text-align: center;"><u>Contact linéaire entre 02 roues cylindriques</u></p>	 <p style="text-align: center;"><u>Contact linéaire entre dentsures</u></p>	 <p style="text-align: center;"><u>Contact circulaire (bille-disque)</u></p>
Paramètres d'essais	<ul style="list-style-type: none"> - Corps 1 : Roulement à billes : 100Cr6, HRc=61, diamètre extérieur = 25mm, Ra=0,12 µm ; - Corps 2 : Cylindre en acier dur : HRc=61, diamètre extérieur =25mm, Ra=0,25µm ; - Le lubrifiant (huile ISO VG 220) ; - Charge : Après étalonnage la charge maxi utilisée est de : $W_{max} = 134 \text{ N}$ - Vitesse de rotation : $n = 900 \text{ tr/mn}$. - Le polluant (sable filtrée à 40 µm). 	<p>I Usure des engrenages:</p> <ul style="list-style-type: none"> - La micro-géométrie des roues dentées (Ra =0,2 µm) ; - Engrenage de nombre de dents (32 et 55) respectivement ; - Le lubrifiant (huile ISO VG 220) ; - Le polluant (sable filtrée à 40 µm) ; - La charge normale transmise $W = 265 \text{ N}$; - Le matériau C45 ; - La vitesse de rotation du pignon moteur, $n = 200 \text{ tr/min}$. <p>II Investigation granulométrique:</p> <ul style="list-style-type: none"> - La micro-géométrie des roues dentées (Ra =0,2 µm) ; - Engrenage de nombre de dents (36 et 56) respectivement ; - Le lubrifiant (huile ISO VG 220) ; - Le polluant (sable filtrée à 40 µm) ; - La charge linéaire transmise $W = 392 \times 10^3 \text{ N/m}$; - Le matériau C45 ; - La vitesse de rotation $n = 250 \text{ tr/min}$; 	<ul style="list-style-type: none"> - La micro-géométrie des éprouvettes (Ra =0,1 µm pour la bille et le disque) ; - Matériau des éprouvettes AISI 52100 ; - Le lubrifiant (huile synthétique PAO 8) ; - Le polluant (sable filtrée à 40 µm) ; - Pour une charge linéaire transmise $W = 0.981 \text{ N} \Rightarrow P_h = 655.284 \text{ MPa}$; - Pour une charge linéaire transmise $W = 1.96 \text{ N} \Rightarrow P_h = 825.325 \text{ MPa}$; - La vitesse de rotation $n = 6000 \text{ tr/min}$; - La solution polluée de concentration (5 et 10) g/l ; - Le glissement spécifique, g.s.= 100 %.